变质深熔作用与成岩成矿关系研究*

Research on Relationships Between Metamorphic Anatexis and Petrogenesis-Mineralizations

李兆麟

（中山大学地球科学系，广东 广州 510275）

Li Zhaolin

(Department of Earth Sciences, Zhongshan University, Guangzhou 510275, Guangdong, China)

摘 要 变质作用与地壳形成演化过程密切伴生，并与成岩成矿作用具密切关系。从动力学系统分析，区域变质作用—混合岩化作用—变质深熔作用是温压递进性变质作用。变质深熔作用是变质过程一个重要组成部分，它具有独特的温压、热力学、动力学及地球化学特性，文中定义为变质深熔系统，简称 MAS，它是由物质来源、能量来源、作用形式，物质转移与富集，形成时间与位置等要素组成。文中列举与变质深熔作用有关的花岗质岩石及矿床实例，并据 MAS 要素分析其成岩、成矿机制，剖析了哀牢山变质带、云开变质带花岗质岩石属变质深熔成因，变质带中伟晶岩矿床、剪切带金矿床形成与变质深熔作用具密切关系。当前国际上十分重视在矿床形成和物质转移中变质作用研究，因此深入开展变质深熔作用与成岩成矿关系研究具重要理论和实践指导意义。

关键词 变质作用 变质深熔系统 变质深熔 成岩 成矿

变质作用是地质作用过程一个重要的阶段，是地壳构造运动过程一个动力学系统，它对岩石改造、物质转移、富集及成岩成矿起着重要作用，它存在于地球形成演化的全过程。地质构造运动-变质作用-岩浆作用-流体形成演化与成岩成矿关系紧密相关。本文只从变质深熔作用与成岩成矿关系作一讨论。

1 变质深熔系统（MAS）

从动力学观点分析，区域变质作用—混合岩化作用—变质深熔作用属于温压递进性变质作用。因此，变质深熔作用是变质作用过程一个重要组成部分，它是在混合岩化基础上产生更高温高压的超变质作用阶段，具有独特动力学、热力学及地球化学性质，是变质作用过程一个独立的地球化学系统。它具有独特的变质作用驱动力、高温高压地球化学场（HP-HT-V-X）、交代-熔融作用及时空分布特性，体系的性质属熔体-溶液或熔体，故定义为变质深熔系统（Metamorphic Anatexic Systems，简称 MAS）（李兆麟，2001）。其概念可包括以下主要因素：① 物质来源；② 能量来源；③ 作用形式；④ 物质改造、转移与聚集；⑤ 形成位置与时间。

2 变质深熔作用与成岩关系

在变质带不少岩石类型与变质深熔作用成因相关，如哀牢山变质带片麻状花岗质岩石、云开变质带片

* 国家自然科学基金资助项目（No.49673189; 49873018），高校博士学科点专项科研基金资助项目（98055807）
作者简介 李兆麟，男，1932 年生，教授、博士生导师、国际矿物协会（IMA）矿物中包裹体专业委员会副主席，长期从事矿床地球化学及实验地球化学教学及科研工作。

麻状花岗质岩石、闽西变质带建瓯群片麻状花岗岩、山东玲珑花岗岩、西班牙贝蒂克山链混合岩中浅色花岗岩等，其形成机制具变质深熔成因条件。

（1）物质来源与作用形式：在变质带中由变质深熔作用形成的花岗质岩石物质来源主要来自基底建造沉积变质岩，在变质带中区域变质岩-眼球状混合岩-混合花岗岩-片麻状黑云母花岗岩及伟晶岩是一个温压递进变质作用过程不同阶段的产物。在不同温压及介质条件下，基体岩石产生复杂的交代-熔融、溶解-沉淀（结晶作用）作用，导致原岩遭受改造，产生物质转移再分配和富集作用，形成不同类型花岗质岩石。上述系列岩石成分演化存在继承与发展的关系，随着变质作用程度增强，Si、Al、Na、K 升高，Ca、Mg、Mn、Fe、Ti 下降（表 1），即当区域变质作用进入混合岩化超变质作用阶段，基体岩石的物质发生转移，其中 K、Na、H_2O 开始活动沿片理、片麻理等弱化面进行交代形成长英质脉体。随着混合岩化作用加强，活性组分析出增加，超变质作用进一步加强，温压进一步增加，析出大量 K、Na、H_2O 等活性组分对基体岩石进行全面渗透交代作用，并达到基体岩石局部熔融或熔融。此时温压条件已达液相线进入超变质作用阶段，形成具成分近于均匀的花岗质岩浆，并形成均质的花岗岩。当岩浆演化过程继续遭受区域构造作用，则花岗岩产生片麻状构造，在片麻状花岗岩中经常还保留未彻底交代熔融的基体岩石残留体，可反映出变质深熔过程中交代与熔融作用并存。当温压条件在液相线范围，花岗质岩浆可以产生岩浆分异，形成更酸性的花岗岩浆，侵入到早期形成的片麻状花岗岩体内或变质岩中，呈岩株状产出的二长花岗岩或细粒花岗岩。

表 1　哀牢山变质带不同类型岩石化学成分

岩石名称	分析个数	w_B / %												资料来源*
		SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	烧失量	总量	
区域变质岩	17	57.45	0.989	12.584	2.415	5.336	0.145	5.54	8.381	1.904	2.198	0.213	1.058	98.213	1
片麻岩	2	57.80	1.71	15.77	3.12	6.47	0.13	3.38	4.445	1.355	2.04	0.49	1.65	98.36	1
眼球混合岩	2	59.655	0.625	18.05	1.31	3.08	0.07	1.765	3.785	4.64	4.88	0.31	0.33	98.5	1
混合岩化花岗岩	2	73.395	0.005	14.105	0.625	1.11	0.02	0.44	1.165	3.595	5.25	0.03	0.2	99.94	1
黑云母花岗岩	1	73.00	0.23	14.53	1.06	0.56	0.017	0.250	2.06	3.33	4.47	0.86	0.79	101.157	2
伟晶岩	3	72.326	0.073	13.63	1.453	0.996	0.016	0.327	1.787	3.583	4.793	0.026	0.293	99. 303	1

资料来源注：1—据云南地质矿产局（1990，1995），数据由分析资料综合得出。笔者认为，表中部分分析总量略偏低，但能反映岩石化学成分变化规律；2—本文作者，分析者：中国科学院广州地球化学研究所胡光黔。

（2）变质深熔作用能量来源与温压条件：区域变质作用—混合岩化作用—变质深熔作用其温压条件属递进性，其动力学系统能量来源主要来自地质构造作用——强烈褶皱、推覆、剪切、断裂等驱动力所产生的热压能量。此外，盖层地温增加、深大断裂引发深部地壳热流值增加的综合因素，变质区局部地段温压条件达液相线，使基体岩石产生局部熔融或熔融。关于变质深熔作用导致岩石局部熔融的温压条件，据花岗岩熔融实验赵斌总结国内外花岗岩熔化条件为 650～900℃、1000×10^5～4200×10^5 Pa(赵斌等，1995)，笔者与周义明博士运用 HDAC 在饱和水条件下对哀牢山黑云母花岗岩进行熔融实验，熔融温压为 759~760℃、2250×10^5 Pa，岩石熔化量达 85%～90%。国外学者曾进行陆壳岩石缺气、缺流体熔融实验，长英质及泥质岩石在缺流体条件下 810～990℃、0.1～1 GPa，熔化量达 30%～60%（Vielzeuf D.，1994；Skjerlie K.P，1993，1995）。此外，胶东花岗岩（滦家河、玲珑与郭家岭）副矿物熔融包裹体均一温度为 780～980℃（Li，1997；李兆麟，1999）。上述研究成果对变质岩通过变质深熔作用形成花岗质岩石的温压条件估计有重要参考价值。

（3）H_2O、挥发分及超临界流体与变质深熔：变质作用过程可使沉积变质岩产生去水去挥发份作用，

这些组分在系统中对基体岩石起着降低熔点及粘度、增加溶解度的作用，在 H_2O 及挥发分参与岩石熔融条件下，可以大大降低固相线温度 300～400℃。此外，超变质作用可以产生不同性质超临界流体，它具独特热力学及传输性能，对提高流体及熔体的活动行为起重要作用。因此超临界流体在变质深熔作用过程对基体岩石熔融、物质运移、成岩成矿起着重要作用。

（4）形成位置与时间：变质深熔作用多在混合岩区域内产生，由此作用形成的片麻状花岗岩或花岗岩小岩株多在混合岩区域内分布，亦有入侵至区域变质岩中。其形成时期与变质带所经历的构造旋回及变质作用相关，一般是多期性的。如哀牢山群片麻状花岗岩为印支期及喜山期，云开群片麻状花岗岩为加里东、海西-印支期。

按上述变质深熔概念认识变质带中片麻状花岗质岩石的形成机制、时空分布规律，对解释其成因具重要意义。

3 变质深熔作用与成矿关系

变质深熔作用与成矿关系十分密切，以往主要从变质热液的观点来解释一系列金属与非金属矿床的成因，未涉及此类型矿床与变质深熔作用所产生的熔体-溶液或熔体的关系。变质深熔作用是否可以使成矿物质转移、富集成矿，形成变质深熔成因矿床？据目前研究资料，此类型矿床虽不多，但答案是肯定的，现分述如下：

3.1 哀牢山含海兰宝石伟晶岩矿床

据 MAS 要素分析，哀牢山含海兰宝石伟晶岩属变质深熔成因，其主要依据如下：

（1）该区含海兰宝石伟晶岩在变质岩、混合岩及片麻状花岗岩内外接触带中分布，伟晶岩成矿带与变质带区域构造线延伸方向（NW-SE）一致。

（2）据伟晶岩石英与变质岩中肠状石英脉 H、O 同位素相近似，表明流体来源相似，成矿流体与变质作用具密切关系。伟晶岩的 Sr 同位素 N（^{87}Sr）/N（^{86}Sr）比值为 0.706781～0.710744，与变质岩中肠状石英脉及片麻状花岗岩的相似，显壳源特征。伟晶岩的 Si 同位素值范围 $\delta^{30}Si_{NBS-28}$ 为-0.1‰～-0.3‰，落在不同类型变质岩 Si 同位素值范围（-0.5‰～0.3‰）内，表明伟晶岩 Si 来源于变质岩。此外，He 及 Ar 同位素组成 N（^{3}He）/N（^{4}He）、N（^{40}Ar）/N（^{36}Ar）、N（^{40}Ar）/N（^{38}Ar）、N（^{36}Ar）/N（^{38}Ar）比值，在伟晶岩矿物及变质岩石英脉中具相似性。上述研究证实伟晶岩成矿流体及成岩物质来源与变质岩具密切关系。

（3）稀土及成矿元素 Be 地球化学特性：据该区伟晶岩、混合岩化花岗岩、变质岩中石英脉的稀土元素球粒陨石标准化分配曲线特征彼此相似，均属右倾、LREE＞HREE、Eu 负异常的特征，它们的成岩物质来源相似，均属壳源。各类岩石中 Be 含量表明，随着变质作用加强，Be 在岩石中含量增加，在伟晶岩中有较大富集，故可形成铍矿物——绿柱石及海兰宝石。

（4）包裹体、均一温度及流体特征：在该区伟晶岩矿物中首次发现熔融包裹体及流体—熔融包裹体，其均一温度分别为 760～977℃及 400～917℃（李兆麟，2000）。其中熔融包裹体均一温度与该区条带混合岩及变质岩中肠状石英脉相似（950～962℃），表明伟晶岩形成条件与超变质作用具密切关系。伟晶岩及变质岩中石英脉的流体及微量气体成分具相似成分序列。Ca＞Na＞Mg＞K，HCO_3^-＞SO_4^{2-}＞Cl^-＞F^-，H_2O＞CO_2＞CO＞C_2H_6，表明伟晶岩流体性质与变质流体相似。

（5）伟晶岩结构模拟实验：在 840℃、1500×10^5 Pa 进行变质岩熔融实验，在达液相线后缓慢降温，获一系列伟晶岩结构、构造（文象结构、长石粗晶结构，晶洞构造等），为伟晶岩变质深熔成因提供有力依据。

（6）伟晶岩变质深熔成因模式：哀牢山变质带经历多期构造运动及区域变质作用，其中尤以印支期及喜山期构造旋回影响较大，形成广泛分布的区域变质岩及混合岩。这些岩石的强烈超变质作用处于高温高压环境，加以地壳热流值增加，导致基底岩石产生熔融或部分熔融。当原岩含较多含水矿物

时，变质深熔作用释放出大量 H_2O 和挥发分形成富水富挥发分独立伟晶岩浆，其性质属熔体-溶液，在有利构造条件下沿裂隙入侵，在封闭的环境缓慢降温，伟晶岩浆产生良好的结晶分异作用，形成本区含海蓝宝石伟晶岩。

3.2　新疆乔尔山和粤西河台剪切带金矿床

乔尔山和河台韧性剪切带金矿床，分别产于志留-泥盆系及震旦系云开群变质岩中，据同位素及微量元素地球化学研究成果表明，二地区的成矿物质来源分别来自志留-泥盆系变质岩及粤西云开群变质岩。在研究工作中我们在 2 个剪切带金矿床含金石英脉及糜棱岩中首次发现熔融包裹体及流体-熔融包裹体，包裹体大小（μm）为 2×3～60×60，均一温度熔融包裹体为 785～970℃（乔尔山）及 840～880℃（河台），流体—熔融包裹体为 600℃（河台），不混熔液相包裹体为 530℃（河台），气-液包裹体为 295～390℃（乔尔山）及 180～350℃（河台）。运用电子探针及电镜能谱对 2 个矿床熔融包裹体子矿物的成分进行分析，鉴定出石英、白云母、磁铁矿、钾长石等 10 种子矿物，为上述金矿床熔融包裹体存在提供有力依据（李兆麟，2001）。在变质深熔作用及强烈动力变质作用下，基底建造沉积变质岩可以产生熔融或局部熔融，形成硅酸盐熔体。岩石中的金可以活化转移在熔体集中，形成含金铝硅酸盐熔浆，并沿构造裂隙往上运移，在韧脆性（河台）或剪切带上部脆性断裂带充填形成剪切带型含金石英脉（乔尔山）。2 个金矿床成矿与多阶段铝硅酸盐熔体及流体作用相关。

4　结论

（1）从动力学系统分析，区域变质作用—混合岩化作用—变质深熔作用是温压递进性变质作用过程。

（2）变质深熔作用是变质过程一个重要组成部分，它具有独特的温压、热力学、动力学及地球化学特性，文中定义为变质深熔系统（MAS），它是由物质来源、能量来源、作用形式、物质转移与富集及形成时间与定位等要素组成。

（3）据 MAS 要素分析了变质带有关花岗质岩类及矿床的成岩成矿机制，剖析了哀牢山变质带、云开变质带花岗质岩石的变质深熔成因，变质带中伟晶岩矿床、剪切带金矿床的形成与变质深熔作用具密切关系，研究成果对当前成岩成矿理论研究具重要意义。

在本文工作中得到周义明教授、张文兰高工的指导和热情帮助特致衷心谢忱

参　考　文　献

李兆麟.2001.天关于变质深熔作用与成岩成矿关系的思考[J]. 地学前缘，8（3）：29～39.

云南省地质矿产局.1990. 云南省区域地质志[M]. 中华人民共和国地质矿产部地质专报,区域地质，第 21 号. 北京：地质出版社.448～634.

赵斌，吴厚泽，王声远,等.1995. 高温高压实验地球化学[M]. 北京：科学出版社.167～245.

李兆麟.1999. 不同岩浆岩副矿物中硅酸盐熔融包裹体研究[A]. 见：蔡爱莉，第 30 届国际地质大会论文集，第 16 卷，矿物学[C].北京：地质出版社.188～195.

李兆麟，张文兰，李文,等.2000. 云南哀牢山和新疆可可托海伟晶岩矿物中熔融包裹体电子探针研究[J]. 高校地质学报，6（4）：509～522.

李兆麟，翟伟，黄栋林,等.2001. 新疆乔尔山和粤西河台韧性剪切带金矿床中熔融包裹体的发现及矿床成因[J]. 矿床地质，20（3）：208～215.